

На правах рукописи



НЕДОПЕКИН АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КВ СИГНАЛОВ С
ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

Специальность: 05.12.04 — Радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань — 2012

Диссертационная работа выполнена на кафедре прикладной математики и информатики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Марийский государственный университет»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
Марийский государственный университет
доцент Колчев Алексей Анатольевич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Казанский федеральный университет
профессор Ибатуллин Эмир Аминович.

кандидат технических наук,
Марийский государственный технический
университет
доцент Хафизов Динар Гафиятуллович.

Ведущая организация: ФГБОУВПО «Нижегородский
государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»

Защита состоится 21 февраля 2012 г. в 16 часов 00 минут в ауд. 1407 Института физики на заседании диссертационного совета Д212.081.18 в ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Автореферат разослан 21 января 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета д. ф.-м. н., профессор



А.В. Карпов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Надежность и качество систем КВ радиосвязи в первую очередь зависят от условий распространения сигналов в ионосферной радиолинии и помеховой обстановки. К наиболее важным особенностям ионосферной радиолинии, которые накладывают ограничения на использование высокоскоростных и широкополосных систем КВ радиосвязи, относятся: многолучевость, обусловленная слоистой структурой ионосферы и магнитоионным расщеплением распространяющихся волн; частотные и временные вариации, обусловленные зависимостью показателя преломления ионосферы от частоты и времени. Дифференциальный доплеровский сдвиг между лучами на данной рабочей частоте приводит к интенсивным замираниям и значительным частотно-селективным помехам особенно высокоскоростным (широкополосным) системам связи.

В связи с этим для повышения эффективности современных систем КВ радиосвязи необходимо постоянно знать условия распространения сигналов в ионосферной радиолинии. Среди множества видов сигналов различной частотно-временной структуры, используемых для диагностики ионосферных радиолиний, широкое распространение в настоящее время имеет непрерывный линейно частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал.

Основными параметрами, которые характеризуют состояние ионосферного широкополосного радиоканала, являются время группового запаздывания и доплеровское смещение частоты. В настоящее время для зондирования ЛЧМ сигналом известны два способа одновременного определения частотных зависимостей времени группового запаздывания и доплеровского сдвига: периодическим и двойным ЛЧМ сигналом.

При использовании периодического ЛЧМ сигнала излучается последовательность коротких ЛЧМ-импульсов с одной начальной частотой, при этом необходимо большое время зондирования на одной частоте и, как следствие, большой частотный шаг между измерениями. Способ зондирования двумя непрерывными ЛЧМ сигналами использует фазовые измерения для определения доплеровского смещения частоты и лишен недостатка дискретности измерений, но его непосредственная реализация вызывает значительные технические трудности, требуя двух передатчиков и двух приемников. Разработка упрощенной методики реализации этого способа является актуальной.

Для обоих рассмотренных способов существует проблема обработки получаемых данных. При зондировании ионосферы сигнал с ЛЧМ пробегает весь диапазон ДЧМ радиоволн. Элемент зондирующего сигнала занимает широкую полосу частот — порядка сотен кГц. Поэтому узкополосные радиотехнические устройства, работающие в этом диапазоне, выступают в качестве сосредоточенных помех, которые существенно влияют на

статистическое распределение отсчетов сигнала на выходе приемника. Обработка принятого сигнала методом сжатия в частотной области, осуществляемая для выделения квазигармонических сигналов зондирования, также видоизменяет статистическое распределение. Несмотря на указанные особенности широкополосных сигналов зондирования, для обнаружения таких сигналов по-прежнему применяются подходы, используемые для случая узкополосного сигнала.

Целью диссертационной работы является разработка новых методик и алгоритмов для автоматической обработки нестационарных сигналов с ЛЧМ при ионосферном зондировании.

Исходя из указанной цели, поставлены **следующие задачи**:

1. Разработка методики одновременного определения частотных зависимостей доплеровского смещения частоты и времени группового запаздывания отдельных мод ионосферного распространения КВ с помощью непрерывного амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала.
2. Оценка ошибок методики определения доплеровского смещения частоты в зависимости от шумов, частотно-временной дисперсии среды распространения сигнала и аппаратных погрешностей.
3. Разработка методик автоматической обработки данных зондирования для случая периодического и непрерывного ЛЧМ сигнала, включающих в себя критерии обнаружения и выделения сигналов в спектральной области.
4. Построение алгоритмов обработки оцифрованного принятого сигнала сжатого в частотной области для случаев зондирования периодическим и непрерывным ЛЧМ-сигналом и их программная реализация.

Методы исследования. Для решения поставленных задач и получения основных научно-практических результатов использованы методы теории поля в приближении геометрической оптики, методы математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, математического и информационного моделирования. Экспериментальные исследования проведены с использованием Российской и международной сети ЛЧМ-ионозондов и специально разработанного автором программного обеспечения. Эффективность алгоритмов обработки данных проверена с помощью натурных экспериментов и методов статистического оценивания.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана новая методика одновременного определения доплеровского смещения частоты и времени группового запаздывания мод ионосферного распространения с помощью непрерывного двойного ЛЧМ сигнала, реализуемого за счет балансной амплитудной модуляции.
2. На основе теоретических и экспериментальных исследований получены аналитические выражения для оценки влияния шума ДКМ диапазона и частотно-временной дисперсии на погрешность разработанной методики.

3. По экспериментальным исследованиям выборок ЛЧМ сигнала и шумов ДКМ диапазона в спектральной области после обработки методом сжатия в частотной области установлен факт априорной непараметрической неопределенности и нестационарности их статистических характеристик.

4. Предложена новая методика обнаружения и выделения сигнала в условиях априорной непараметрической неопределенности, основанная на разделении вариационного ряда спектральной выборки на части, соответствующие шуму и сигналу с использованием оценок квантилей, среднеквадратического отклонения и энтропийного коэффициента.

5. Разработаны методика и алгоритмы автоматической обработки данных зондирования периодическим ЛЧМ сигналом в условиях нестационарности параметров канала распространения, воплощенные в программном комплексе.

Практическая ценность работы состоит в том, что:

1. Разработанная методика измерений доплеровского смещения при зондировании непрерывным двойным ЛЧМ сигналом реализуема с использованием одного передатчика и одного приёмника. На основе проведенного анализа ошибок методики сформулированы технические требования к аппаратуре зондирования.

2. Предложенная методика обнаружения и выделения сигналов зондирования в условиях априорной непараметрической неопределенности может быть использована для обнаружения и выделения произвольных сигналов, обладающих подобными статистическими свойствами.

3. Разработанный программный измерительный комплекс может быть использован в системах частотного обеспечения КВ радиосвязи и для повышения информативности радиофизических исследований.

Реализация результатов работы:

Разработанный подход обнаружения и выделения сигнала использован автором в работах по гранту РФФИ № 07-01-00293 «Преодоление непараметрической неопределенности при обнаружении сигналов в радиофизических измерениях на основе энтропийных оценок». Алгоритмы обработки ЛЧМ сигнала ионосферного зондирования использованы в ГУ ААНИИ в рамках работ по Федеральной целевой программе «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ на 2008-2015 г.г.», о чем имеются соответствующие документы о внедрении.

На защиту выносятся:

1. Методика одновременного измерения доплеровского смещения и времени группового запаздывания для каждой ионосферной моды при помощи непрерывного ЛЧМ сигнала. Оценка точностных характеристик предложенной методики.

2. Результаты исследований статистических свойств сигналов на выходе приемника ЛЧМ-ионозонда в частотной области, доказывающие факт априорной непараметрической неопределённости.

3. Критерии обнаружения и выделения сигналов ЛЧМ зондирования в частотной области, основанные на методиках обнаружения аномальных отсчетов в экспериментальных измерениях.

4. Алгоритмы и программный комплекс автоматического определения времени группового запаздывания и доплеровского смещения зондирующего сигнала в случае зондирования периодическим ЛЧМ сигналом.

Достоверность результатов обусловлена соответствием результатов, полученных путем аналитического и численного моделирования, результатам экспериментальных исследований, выполненных в рамках данной работы и другими исследователями. Эффективность разработанных алгоритмов подтверждена натурными испытаниями и повторяемостью результатов на больших объемах экспериментальных данных, полученных в период 2006-2011 г.г.

Апробация работы и публикации:

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены на XXII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (Ростов-на-Дону, 2008); XIII-XVII международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь — RLNC» (Воронеж, 2007-2011); международных конференциях молодых учёных «Дистанционное радиозондирование ионосферы» (Харьков, 2010-2011); XV и XVI региональных конференциях по распространению радиоволн (Санкт-Петербург, 2009-2010); Третьей Волжской региональной молодежной научной конференции «Радиофизические исследования природных сред и информационные системы» (Зеленодольск, 2010); XXVII всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 2011), IX Международной IEEE -сибирской конференции по управлению и связи — SIBCON'2011 (Красноярск), XIX Туполевских чтениях (Казань, 2011).

По материалам диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 2 статьи и 1 сообщение в журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора заключается в обосновании и разработке методик, разработке алгоритмов и написании программ. Автором проведены аналитические построения и математическое моделирование, обработка экспериментальных данных, получены основные результаты и сформулированы выводы. Учитывая, что обработку значительного объёма экспериментальных данных невозможно провести единолично, роль диссертанта в них заключалась в формулировании задач, систематизации данных, участии в проведении эксперимента. По этой же причине многие публикации диссертанта имеют соавторство.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение и приложение. Она состоит из 162 страниц основного текста, 55 иллюстраций, 18 таблиц, списка цитируемой литературы из 118 источников.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость результатов работы, приведена структура диссертации.

В первой главе рассматривается ионосферный КВ-радиоканал и факторы, влияющие на его характеристики.

Подробно рассматривается зондирование с использованием ЛЧМ сигнала. За счет сжатия в частотной области достигается высокое отношение сигнал/шум при малых мощностях передающих устройств. Обработка разностного сигнала производится поэлементно в частотной области, что позволяет разделять отдельные моды ионосферного распространения по времени группового запаздывания. Для этого вначале необходимо определить элементы, содержащие полезный сигнал (обнаружение), а затем в спектрах этих элементов провести выделение спектральных компонент, относящихся к модам ионосферного распространения — выделение сигнала.

Рассмотрены два способа зондирования с применением ЛЧМ сигнала. Многочастотное доплеровское зондирование периодическим ЛЧМ-сигналом и зондирование двумя непрерывными ЛЧМ сигналами, в котором для определения частотного сдвига используется разница фаз второго и первого сигнала.

Первый способ заключается в том, что излучается последовательность из N ЛЧМ-импульсов длительностью T_{Σ} с заданной частотной девиацией, начиная с заданной стартовой частоты f_0 в течение времени $T_a = T_{\Sigma} \cdot N$. Зондирование осуществляется циклами на определенном наборе стартовых частот. Спектр последовательности импульсов является линейчатым, по сдвигу максимумов спектра определяется доплеровское смещение.

Второй способ состоит в излучении двумя передатчиками двух непрерывных ЛЧМ сигналов, один из которых запаздывает от другого на время T . Прием сигналов осуществляется на два приемника, в которых синтезируются сигналы гетеродина, когерентные каждому соответствующему передатчику. После сжатия в частотной области и фильтрации нижних частот измеряется фаза для обоих сигналов. Разность фаз запаздывающего и опережающего сигнала, отнесенная ко времени T , соответствует доплеровскому сдвигу. Этот способ представляется более удобным с точки зрения получения непрерывных зависимостей измеряемых параметров от частоты зондирования, но для своей непосредственной реализации он

требует двух идентично настроенных передатчиков и двух приемников, что сложно реализовать технически.

На основе анализа работ по обработке данных ионосферного зондирования делается вывод о целесообразности поэлементной обработки сигнала в спектральной области.

Проводится статистический анализ ЛЧМ сигналов: периодического и непрерывного. Рассматривались данные, полученные на трассах зондирования с пунктами передачи в Великобритании (Inskip), Франции (46° с. ш., 4° в. д.), Норильске и Хабаровске и приемном пункте в г. Йошкар-Ола, за период 2009-2010 гг. Для установления видов законов распределения шумовых выборок и выборок, содержащих сигнал, использовались классификации: по типам кривых Пирсона, топографическая классификация, классификация по типам кривых Джонсона, критерий Пирсона на уровне значимости 95%.

Анализ статистических свойств абсолютных значений спектральных отсчетов сигнала показал отсутствие преобладающего закона распределения вероятностей и высокую изменчивость статистических параметров рассмотренных выборок. По критерию Пирсона, как для сигнала, так и для шума не выявлено общего распределения: к логнормальному закону принадлежит 60% выборок шума и 12% сигнала, к обобщенному экспоненциальному — 31% выборок шума и 22% сигнала (всего к распределениям, связанным с нормальным относится 63% выборок шума и 30% выборок сигнала). Не подтвердилось предположение для амплитудных спектров элементов сигнала о принадлежности их к нормальному распределению или распределению Райса. Установленные факты позволяют говорить об априорной непараметрической неопределенности при рассмотрении амплитудных спектров на выходе системы сжатия в частотной области при ЛЧМ-зондировании ионосферы. Кроме того, установлена существенная нестационарность процесса: в случае периодического сигнала по критерию Колмогорова-Смирнова к одной генеральной совокупности относится только 16,9 % соседних усредненных спектров «шума» и 49,7 % - «сигнала».

Это требует отказаться от подходов в разработке методик обработки, использующих какую-либо априорную информацию о значениях параметров и виде распределения.

Во второй главе проводится разработка методики доплеровского смещения частоты при помощи непрерывного ЛЧМ сигнала с использованием фазовых измерений.

Описано теоретическое обоснование методики. Предлагается замена двух непрерывных ЛЧМ сигналов на один за счет использования балансной амплитудной модуляции излучаемого сигнала. При этом фазовые измерения будут проводиться с использованием двух любых соседних элементов

оцифрованного разностного сигнала, имеющих между собой малый временной сдвиг T величиной 0,01-0,05 с. Влияние ионосферы на зондирующий сигнал представлено в виде многолучевого нестационарного канала распространения:

$$H(\omega, t) = |H(\omega, t)| \cdot \exp j\phi(\omega, t) = \sum_{i=1}^m |H_i(\omega, t)| \cdot \exp j\phi_i(\omega, t), \quad (1)$$

где $|H_i(\omega, t)|$ — модуль передаточной функции отдельного луча;

$\phi_i(\omega, t)$ — набег фазы отдельного луча в ионосферной радиолинии;

m — число мод распространения.

Элемент зондирующего сигнала занимает некоторую полосу $\Delta f_{\text{Э}} = f \cdot T_{\text{Э}}$ около частоты f_0 . Считая канал квазистационарным для небольших масштабов времени $\Delta t = t - t_0$, фазу передаточной функции отдельного луча, при отсутствии частотной дисперсии, можно разложить в ряд Тейлора по степеням $\Delta\omega = 2\pi \cdot (f - f_0)$ и Δt , ограничившись линейными слагаемыми, а $|H_i(\omega, t)|$ считать постоянным:

$$\begin{aligned} \phi_i(\omega, t) &\approx \phi_i(\omega_0, t_0) + \phi'_{it}(\omega_0, t_0) \Delta t + \phi'_{i\omega}(\omega_0, t_0) \Delta\omega, \\ |H_i(\omega, t)| &= |H_{0i}| = \text{const} \cdot \zeta \end{aligned} \quad (2)$$

Установлены условия возможности фазовых измерений, налагающие ограничения на частоту амплитудной модуляции, время сдвига между элементами, частоту дискретизации принятого сигнала:

$$T = 2f_M / f \quad (3)$$

$$f_M T - [f_M T] = 0. \quad (4)$$

$$\text{mod}(F_{ADT} \cdot T, 100) = 0, \quad (5)$$

где f — скорость перестройки частоты ЛЧМ сигнала, f_M — частота амплитудной модуляции, T — временной сдвиг между взятыми для измерений элементами анализа, F_{ADT} — частота дискретизации разностного сигнала.

Для амплитудно-модулированного сигнала разработана следующая методика. Рассматриваются два соседних элемента анализа длительности $T_{\text{Э}}$ (k -ый и $(k+1)$ -ый), считанные со сдвигом между ними T из файла формата .wav, содержащего оцифрованный разностный сигнал. Для

некоторой выбранной i -ой моды рассматриваются верхняя боковая частота $S_{ik,2}(\Omega)$ в спектре k -го элемента (Рис. 1 а) и нижняя боковая частота $S_{i(k+1),1}(\Omega)$ в спектре $(k+1)$ -го элемента (Рис. 1 б). Доплеровское смещение частоты $F_{\partial ik}$ для элемента сигнала каждой i -й моды распространения с центральной частотой $f_{0k} = f_H + f \cdot T(k-1/2)$ находится по формуле:

$$F_{\partial ik} = (\phi_{i(k+1)} - \phi_{ik}) / (2\pi T), \quad (6)$$

где $\phi_{i(k+1)}$ и ϕ_{ik} — значения фаз, полученные из комплексного спектра.

Для определения времени группового запаздывания используется амплитудный спектр $S_{ik,2}(\Omega)$ разностного сигнала. Модули $|S_{ik,2}(\Omega)|$ имеют максимумы на частотах $\Omega_{k,2i} = 2\pi(f\tau_i + f_M - F_{\partial i})$. Для условий ионосферного распространения $f\tau_i \gg F_{\partial i}$, поэтому

$$\tau_{ik} \approx (\Omega_{k,2i} - 2\pi f_M) / (2\pi f) \quad (7)$$

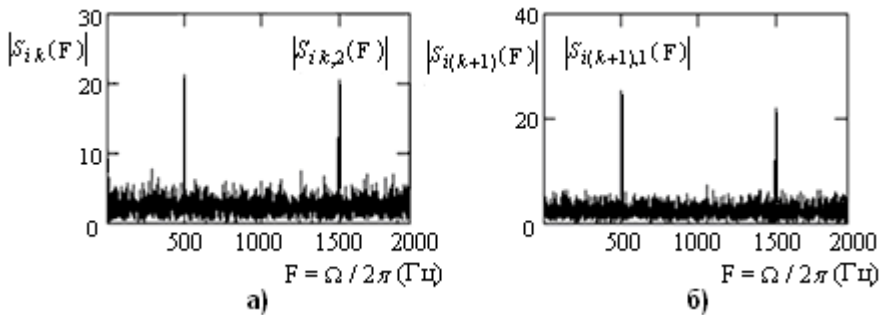


Рис. 1. Пример спектров двух соседних элементов анализа

Путем регистрации изменения в положении максимумов модуля спектра от элемента к элементу при изменении рабочей частоты, получается частотная зависимость времени группового запаздывания $\tau_{ki}(f_{0k})$. При вычислении по формуле (6) значений $F_{\partial ik}$ для каждого элемента сигнала получается частотную зависимость доплеровского смещения частоты $F_{\partial ik} = F_{\partial i}(f_{0k})$.

Проведены экспериментальные исследования коэффициентов корреляции фаз B_ϕ и амплитуд B_A соответствующих спектральных отсчетов шума на

выходе приемника ЛЧМ-ионозонда. Установлено, что коэффициенты корреляции B_ϕ распределены по симметричному закону распределения, близкому к нормальному; с ростом временного смещения увеличивается дискретизация при определении B_ϕ и B_A , что приводит к увеличению погрешности при определении их значений: при одинаковых дисперсиях оценок $\overline{B_\phi}$ отрезок интервальной оценки при смещении 0,05 с в 2,1 раза шире, чем при смещении 0,01 с; среднеквадратические отклонения $\sigma(B_\phi)$ и $\sigma(B_A)$ для всех временных смещений не превышают 0,42 % от самих оценок; доля спектров с равномерно распределенной фазой по полосе составила 0,893, а по времени — 0,854; изменение амплитуд спектральных составляющих шумов при смещении от 0.01 до 0.05 с не превосходит 6 %, т.е. их можно считать постоянными при характерных временных сдвигах.

Эти результаты позволили вывести формулу для оценки погрешности методики в зависимости от уровня шумов:

$$\sigma_\delta = \frac{1}{2\pi T} \cdot \left(\frac{N}{S} \right), \quad (8)$$

где F_δ — доплеровское смещение частоты, а N/S — отношение шум/сигнал. В соответствии с этой формулой погрешность не более 0,1 Гц достигается в среднем при отношении сигнал/шум более 40 дБ. Проведенное полуэмпирическое моделирование подтвердило справедливость приведенных выводов. Установлено, что усреднение соседних результатов уменьшает погрешность методики, при этом порог достижения указанной точности в 0,1 Гц снижается на 5-6 дБ при усреднении по 100 измерений.

Получены аналитические выражения для оценки влияния частотно-временной дисперсии радиоканала на точность определения F_δ . При $F'_{\delta t} \simeq 0,01-0,1$ Гц/с уменьшение разрешающей способности измерения не превосходит 20 %. Показано, что верхняя оценка погрешности фазовой разности при вычислении доплеровского смещения с учётом частотной дисперсии задается следующим соотношением:

$4\pi^2 \cdot \left(f \cdot T F'_{\delta \omega} \tau + (F'_{\delta \omega} T)^2 \right)$. При скорости перемещения отражающего слоя 30-100 м/с потери в разрешающей способности составляют 13-25 %.

Рассмотрено влияние частотно-временной дисперсии на погрешность фазовых измерений. Для этого в разложение набега фазы (2) добавлены соответствующие нелинейные слагаемые. Установлено, что изменение доплеровского смещения частоты во времени $F'_{\delta t}$ в диапазоне 0,01-1 Гц/с и изменение доплеровского смещения с частотой зондирования $F'_{\delta \omega}$ в

диапазоне 10^{-7} - 10^{-6} не приводит к ошибке в определении доплеровского сдвига более 0,01 Гц. Однако уширение сигнала, вызванное дисперсией, приводит к потере мощности и уменьшению отношения сигнал/шум примерно на 6 дБ для наибольших из рассмотренных значений. При рассматриваемых малых смещениях T величина $\partial \tau / \partial f$ воздействия на измерения разности фаз не оказывает.

На основе теоретического анализа установлена зависимость ошибки $\Delta F_{\partial}(f)$ от рассогласования скоростей перестройки частоты передатчика

f_{TR} и приемника f_{RE} :

$$\Delta F_{\partial}(f) = \frac{T}{2} (f_{TR} - f_{RE}) \quad (9)$$

В третьей главе строятся критерии выделения сигнала.

Априорное предположение о виде закона распределения или значениях его параметров относительно амплитудного спектра, в котором производится выделение сигнала, невозможно по причине неопределенности по виду закона распределения и его параметрам. При выделении сигналов полагается, что абсолютные значения спектральных отсчетов, соответствующих сигналу, превышают абсолютные значения отсчетов спектра, соответствующих шуму. Кроме того, доля отсчетов, соответствующих сигналу, составляет несколько (чаще 1-3 %) процентов от общего размера выборки. В связи с этим предложено для выделения спектральных отсчетов сигнала на фоне отсчетов шума использовать подходы, применяемые для выделения аномальных результатов в экспериментальных измерениях. В этом случае плотность распределения вероятностей смеси сигнала и шума в спектральной области $f(x, \gamma)$ можно представить как сумму двух законов (или двух смесей законов):

$$f(x, \gamma) = h_1 f_1(x, \gamma_1) + h_2 f_2(x, \gamma_2), \quad (10)$$

где $f_1(x, \gamma_1)$ — плотность вероятностей, соответствующая отсчетам только с шумом, а $f_2(x, \gamma_2)$ — плотность вероятностей, соответствующая отсчетам с сигналом. Параметры γ и весовые коэффициенты (доля в общей генеральной совокупности) h значительно отличаются (сумма $h_1 + h_2$ равна единице). Причём $\gamma_1 \ll \gamma_2$, а $h_2 \ll h_1$, так как вторая (аномальная) мода распределения, соответствующая сигналу, значительно меньше первой. Отсчеты, соответствующие частотам спектра, на которых различим сигнал (большая амплитуда), должны быть отделены от отсчетов, соответствующих частотам, заполненным только шумом. Распределение смеси сигнал-шум при наличии в ней сигнала будет выглядеть как распределение с «утяжеленным

хвостом». На рис. 2. приведен пример спектральной выборки смеси сигнал-шум (а) и соответствующая ей гистограмма (б).

Для построения критериев обнаружения сигнала проведено полуэмпирическое моделирование статистических параметров выборок с использованием варьированных экспериментальных данных. Выборки нормировались собственным максимальным значением. Наилучшую корреляцию с отношением сигнал/шум S/N показали квантиль 95% $x_{0.95}$ (величина коэффициента корреляции -0,897) и медиана $x_{0.5}$ (-0,898). На уровне 8 дБ, при критическом значении 0,444 равновероятностная ошибка обнаружения для $x_{0.95}$ составила 5,2%. При значениях нормированной величины $x_{0.95}$, меньших критического значения, принимается решение о наличии сигнала в спектре сигнала. При использовании непараметрического критерия для обнаружения сигнала (знаковая статистика) была получена равновероятностная ошибка 26,5%.

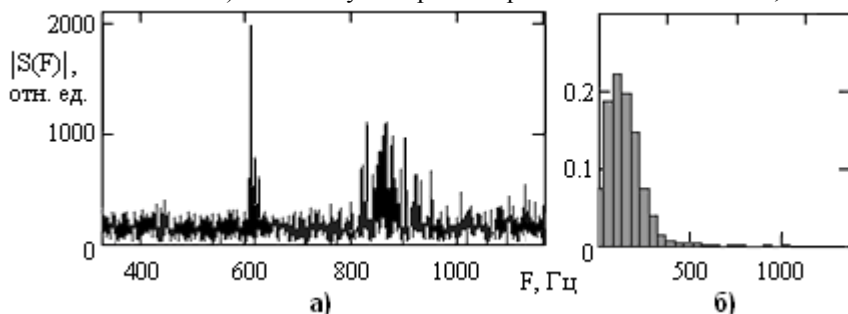


Рис. 2 Амплитудный спектр элемента анализа (а) и его гистограмма (б)

Для периодического ЛЧМ сигнала рассматривался амплитудный спектр, полученный усреднением амплитудных спектров отдельных элементов периодической последовательности для данной стартовой частоты зондирования f_0 . Для него наиболее коррелирующим и гарантирующим наименьшую равновероятную ошибку (3,7%) параметром является квантиль 90% (коэффициент корреляции -0,91) при критическом значении 0,469 на уровне 8 дБ.

При построении критериев выделения сигнала в качестве исходного подхода выбран статистический подход цензурирования аномальных отсчетов в выборках данных. Общий вид критерия цензурирования, известный из математической статистики:

$$|x - x_{II}| > t\sigma, \quad (11)$$

где x_{II} — центр распределения, t — некоторый множитель, именуемый квантильным, σ — среднеквадратическое отклонение для

выборки. Выполнение условия (11) свидетельствует о принадлежности тестируемого отсчета x аномальным отсчетам.

Предложены два эмпирических критерия, использующие квантиль $x_{0.95}$ для случая непрерывного ЛЧМ сигнала и квантиль 75% $x_{0.75}$ для случая периодического ЛЧМ сигнала. Критерий цензурирования принимает вид для непрерывного сигнала:

$$x > x_{0.95} + k\sigma, \quad (12)$$

где k — энтропийный коэффициент, вычисленный для данной выборки.

Для выделения периодического сигнала в усредненном спектре критерий имеет вид:

$$x > x_{0.75} + k\sigma. \quad (13)$$

Выполнение этого условия свидетельствует о том, что рассматриваемый отсчёт x , относится к сигналу.

Кроме критериев, использующих квантили 95% и 75%, был рассмотрен критерий, использующий эксцесс распределения, который применяется в статистике для очистки выборок от аномальных отсчетов:

$$x - \bar{x} \leq (1.55 + 0.8\sqrt{\varepsilon - 1} \cdot \lg(n/10)) \cdot \sigma \quad (14)$$

где \bar{x} — выборочное среднее значение, n — объем выборки, ε — эксцесс выборки. Для адаптации критерия к рассматриваемым условиям расчет параметров проводится по первым 90% вариационного ряда. При этом возможны итерационные пересчеты параметров критерия по изменяющейся доле рассматриваемого вариационного ряда, зависящей от предыдущих итераций.

Путем полуэмпирического моделирования проведено исследование эффективности предложенных критериев выделения для непрерывного сигнала. Рассматривался собственно критерий выделения и критерий выделения с предварительным обнаружением выборок, содержащих сигнал. Для критерия с квантилем уровень ошибки второго рода β (пропуск сигнала) в 5% достигается в случае без предварительного обнаружения примерно с 8 дБ, а в случае с обнаружением — с 10 дБ. Выраженной зависимости для ошибки первого рода α от S/N не наблюдается. Для критерия без обнаружения она составляет в среднем 0,13%, для критерия с обнаружением — 0,10%. Также рассматривалась доля «ложных сигнальных спектров» — спектров, в которых критерий совсем не смог выделить сигнал, но выделил в качестве сигнала шумовые отсчеты. Например, при низком значении S/N . Для случая без предварительного обнаружения эта доля составила 3,4%, для случая с обнаружением — 0%.

Для критерия с эксцессом уровень 5% ошибки второго рода в случаях с предварительным обнаружением и без него аналогичен критерию с

квантилем. Для непрерывного сигнала ошибка первого рода в среднем составляет 0,16% в случае без предварительного обнаружения и 0,13% — с обнаружением. Применение предварительной режекции сосредоточенных помех во временной области значимого уменьшения ошибок не дает.

Рассмотрено удаление случайных выделенных отсчетов, которые не относятся к зондирующему сигналу. Удаление проводится при помощи медианной фильтрации либо по отдельным спектрам, либо по всей ионограмме. При этом осуществляется не обработка изображения, а обработка матрицы «индикаторов», соответствующих выделенным спектральным отсчетам, принимающим значения «0» и «1». Сами отсчеты при фильтрации не изменяются. Используется медианная фильтрация по спектрам с апертурой 3, 5, 7 и по двумерному массиву данных, соответствующих ионограмме, с апертурой 3×3 , 5×5 . После медианной фильтрации происходит удаление оставшихся малых участков, состоящих из «1» с определенным порогом p .

В четвертой главе построены алгоритмы обработки для разностного сигнала ЛЧМ-зондирования периодическим и непрерывным сигналом, основывающиеся на выводах статистических исследований третьей главы.

Разработаны алгоритмы обработки для случаев зондирования периодическим и непрерывным сигналом. Для непрерывного сигнала алгоритм имеет две версии: для обычного непрерывного ЛЧМ-зондирования, для зондирования амплитудно-модулированным ЛЧМ сигналом.

На основе алгоритма для обработки периодического сигнала описана созданная программа, проводящая работу с экспериментальными данными в автоматическом режиме (обнаружение и выделение). Программа позволяет выделять полезный сигнал, строить зависимости доплеровского смещения, доплеровского уширения и времени группового запаздывания от зондирующей частоты и времени. Возможно, построение зависимостей всех измеряемых величин от времени по конкретным выделенным частотам зондирования. Программа предусматривает возможность обработки большого объема данных с использованием пакетной обработки.

Для обоих алгоритмов проводится пробная реализация, включающая обнаружение, выделение, фильтрацию двумерным медианным фильтром с апертурой 3×3 . Алгоритм для периодического сигнала показал ошибки первого и второго рода соответственно 0,1% и 6,5% для критерия выделения с квантилем, 2% и 4,5% для критерия с эксцессом. Ошибки первого и второго рода алгоритма для непрерывного сигнала соответственно 0,1% и 7,5% для критерия с квантилем, 0,2% и 3,6% для критерия с эксцессом. Отношение числа выделенных сигнальных отсчетов к числу выделенных шумовых отсчетов составило для алгоритма с первым критерием 0,17, а для алгоритма со вторым критерием 0,29.

Алгоритмы обработки непрерывного ЛЧМ сигнала были также апробированы при определении максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) по ионограмме, построенной из спектров, очищенных от шумов, для последовательностей сеансов зондирования в объеме 4-5 суток с частотой 2 сеанса в час. Рассматривались трассы зондирования Франция (46° с. ш., 4° в. д.) — Йошкар-Ола, Инскип (Великобритания) — Йошкар-Ола, Диксон — Йошкар-Ола, ст. Горьковская (Ленинградская обл.) — Йошкар-Ола; общее число обработанных ионограмм составило 727. Сравнивались значения МНЧ, измеренные оператором, со значениями, полученными в автоматическом режиме. Наименьшую относительную ошибку при определении МНЧ показал алгоритм, использующий критерий выделения с эксцессом — в среднем 1,99%, использующий же критерий выделения с квантилем — 2,08%.

В заключении сформулированы основные выводы, полученные при проведении данной диссертационной работы:

1. Обоснована и разработана методика измерения частотных зависимостей доплеровского смещения частоты и времени группового запаздывания отдельных ионосферных мод сигнала во всей полосе ионосферного распространения КВ при помощи непрерывного амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала. Преимуществом предложенной методики измерения является то, что она может быть реализована с использованием одного передатчика и одного приёмника.

2. Получены аналитические оценки погрешностей измерений в зависимости от отношения сигнал/шум, параметров частотно-временной дисперсии радиоканала, аппаратных ошибок. Проведено математическое моделирование процедуры измерения доплеровского смещения частоты по разработанной методике, в результате которого установлено, что точность определения доплеровского смещения частоты в 0,1 Гц достигается при отношении сигнал/шум не менее 40 дБ. Уменьшение разрешающей способности по доплеровскому смещению частоты из-за частотной дисперсии не превосходит 20 %, из-за временной — 25% при типичных значениях $F'_{\partial t}$ и $F'_{\partial \omega}$. Сформулированы требования к параметрам аппаратуры зондирования.

3. Путем экспериментальных исследований статистических свойств как периодического, так и непрерывного амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала в спектральной области установлено наличие априорной непараметрической неопределенности и нестационарности статистических характеристик выборок сигнала зондирования. В частности, установлено что:

а) для непрерывного ЛЧМ сигнала по критерию Пирсона, как для сигнала, так и для шума не выявлено общего распределения: к логнормальному закону принадлежит 60% выборок шума и 12% сигнала, к обобщённому

экспоненциальному — 31% выборок шума и 22% сигнала (всего к распределениям, связанным с нормальным относится 63% выборок шума и 30% выборок сигнала);

б) для периодического ЛЧМ сигнала процесс на выходе системы сжатия в частотной области существенно нестационарный — по критерию Колмогорова-Смирнова к одной генеральной совокупности относится только 16,9 % соседних усреднённых спектров шума и 49,7 % — содержащих сигнал;

4. На основе анализа экспериментальных данных предложена модель распределения для амплитудных спектров анализируемого разностного сигнала в виде суммы двух распределений с существенно различающимися параметрами. Проведено построение критериев обнаружения и выделения сигнала в частотной области. В качестве критерия обнаружения использовался квантиль $\chi_{0,95}$, обеспечивающий при критическом значении 0,444 равновероятную ошибку 5,2 %. Критерий выделения сигнала основан на использовании энтропийного коэффициента для цензурирования выборки и обеспечивает ошибку первого рода менее 5% при отношении сигнал/шум более 8 дБ. Достоинством предложенных критериев является использование только числовых характеристик распределения, без учета вида закона распределения.

5. На основе предложенных критериев проведена разработка алгоритмов автоматической обработки сигнала для случаев зондирования периодическим и непрерывным ЛЧМ сигналами и создан программный комплекс обработки данных ЛЧМ зондирования для случая периодического сигнала, который позволяет в автоматическом режиме находить зависимости от частоты зондирования для времени группового запаздывания, доплеровского смещения частоты и доплеровского уширения зондирующего ЛЧМ сигнала.

При экспериментальной апробации алгоритмов средние ошибки первого и второго рода составили соответственно 0,1% и 6,5% для периодического сигнала и 0,1% и 7,5% для непрерывного сигнала, что соответствует результатам моделирования. При экспериментальной апробации ошибки первого и второго рода алгоритма с использованием критерия выделения с эксцессом составили соответственно 2% и 4,5% для периодического сигнала и 0,2% и 3,6% для непрерывного сигнала. При определении МНЧ алгоритм, использующий критерий выделения с эксцессом показал ошибку в среднем 1,99%, критерий выделения с квантилем — 2,08%.

В приложении приведен акт внедрения результатов работы.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.**, Шумаев В.В. Одновременное измерение доплеровского смещения частоты и времени группового запаздывания с помощью амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2010. т.53, №9. С. 34-40.
2. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.**, Шумаев В.В. Погрешности измерения доплеровского смещения частоты с помощью амплитудно-модулированного ЛЧМ-сигнала // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2010. № 4. С. 42-48.

Публикации в других научных изданиях:

1. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.**, Фомин Д.А. Развитие алгоритмов обнаружения и различения сигналов в радиофизических измерениях // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2006. Т.13, в.5. С. 866-867.
2. **Недопекин А.Е.** Определение частотной зависимости уровня фоновых шумов по данным ЛЧМ зондирования ионосферы // X Всероссийская научная конференция студентов радиофизиков: Тез. докл. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2006. С. 65-67.
3. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.**, Фомин Д.А., Шумаев В.В., Щирий А.О. Развитие алгоритмов обнаружения и различения сигналов на выходе КВ каналов в условиях априорной неопределенности характеристик сигналов и помех // Труды XIII Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC'2007). Воронеж, 2007. Т.1. С. 145-152.
4. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.** Влияние частотной дисперсии на точность определения доплеровского смещения частоты с помощью ЛЧМ сигналов // Труды XIV Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC'2008). Воронеж, 2008. Т.2. С. 1074-1081.
5. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.**, Шумаев В.В., Фомин Д.А., Щирий А.О. Оценка параметров помех в ДКМ диапазоне по данным ЛЧМ ионизонда // XXII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн» РРВ-22, г. Ростов-на-Дону – п.Лео, 22-26 сентября 2008 г., Труды симпозиума. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008. Том II. С. 53-56.
6. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.**, Шумаев В.В. Применение амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала для измерения доплеровского смещения частоты // Труды XV Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC'2009). Воронеж, 2009. Т.2. С. 623-629.

7. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.**, Фомин Д.А., Шпак Д.Г., Чернов А.Г., Шумаев В.В., Щирый А.О. Развитие измерительных методик ЛЧМ-ионозонда // Тезисы докладов XV региональной конференции по распространению радиоволн. СПб: физ. факульт. СПбГУ, 2009. С. 56-60.
8. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.**, Шумаев В.В. Характеристики шумов КВ диапазона на выходе системы сжатия в частотной области // Конференция «Дистанционное зондирование ионосферы» (ИОН'2010), г. Харьков, 6-9 апреля 2010 г, Сборник тезисов. Харьков: Институт ионосферы МОН и НАН Украины, 2010. С. 30.
9. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.**, Шумаев В.В., Чернов А.Г., Шпак Д.Г., Щирый А.О. Дополнительные функции ЛЧМ ионозонда // Труды XVI Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC'2010). Воронеж, 2010. Т.2. С. 797-808.
10. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.**, Шпак Д.Г. Статистические особенности сигналов ЛЧМ зондирования ионосферы // Сборник трудов Региональной XVI конференции по распространению радиоволн, СПб, 9–11 ноября 2010 г. СПб, 2010. С. 96-99.
11. **Недопекин А.Е.** Автоматическая обработка ЛЧМ сигналов в режиме измерения доплеровского смещения частоты // Радиофизические исследования природных сред и информационные системы [Электронный ресурс]: сборник докладов Третьей Волжской региональной молодежной научной конференции. Зеленодольск: Филиал КФУ в г. Зеленодольск, 2010 г. С. 30-33. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
12. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.** Статистические распределения сигналов ионосферного ЛЧМ зондирования // Конференция «Дистанционное зондирование ионосферы» (ИОН'2011), г. Харьков, 12-15 апреля 2011 г, Сборник тезисов. Харьков: Институт ионосферы МОН и НАН Украины, 2010. С. 41.
13. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.** Обнаружение сигнала ЛЧМ-ионозонда в условиях априорной непараметрической неопределённости // Труды XVII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC'2011). Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2011. Т.3. С. 2469-2477.
14. **Недопекин А.Е.** Программный комплекс обработки сигнала ЛЧМ ионозонда в режиме измерения доплеровского смещения частоты // Наука. Образование. Молодежь, сборник статей. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т., 2011. С. 100-106.
15. Колчев А.А., **Недопекин А.Е.**, Шпак Д.Г., Хобер Д.В. Обработка ЛЧМ сигнала зондирования ионосферы в спектральной области // 2011 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). [Электронный ресурс]: Proceedings. Krasnoyarsk: Siberian Federal University.

Russia, Krasnoyarsk, September 15–16, 2011. P. 453-455. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).